



**You have downloaded a document from  
RE-BUS  
repository of the University of Silesia in Katowice**

**Title:** Ustawa śmieciowa – a co na to mikroorganizmy?

**Author:** Bożena Nowak

**Citation style:** Nowak Bożena. (2014). Ustawa śmieciowa – a co na to mikroorganizmy? W: A. Babczyńska, M. Nakonieczny (red.), "Problemy Środowiska i Jego Ochrony" Cz. 22 (2014), (S. 101-125). Katowice : Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego



Uznanie autorstwa - Użycie niekomercyjne - Bez utworów zależnych Polska - Licencja ta zezwala na rozpowszechnianie, przedstawianie i wykonywanie utworu jedynie w celach niekomercyjnych oraz pod warunkiem zachowania go w oryginalnej postaci (nie tworzenia utworów zależnych).



UNIwersYTET ŚLĄSKI  
W KATOWICACH



Biblioteka  
Uniwersytetu Śląskiego



Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego

**Bożena Nowak**

**Ustawa śmieciowa  
– a co na to mikroorganizmy?**

Uniwersytet Śląski  
Wydział Biologii i Ochrony Środowiska  
Katowice

---

**dr Bożena Nowak** – doktor nauk biologicznych, biotechnolog, pracuje jako adiunkt w Katedrze Biochemii Wydziału Biologii i Ochrony Środowiska, gdzie od lat, wraz ze współpracującymi Instytutami i Wydziałami, prowadzi interdyscyplinarne badania z pogranicza biochemii, mikrobiologii, chemii, fizyki i materiałoznawstwa związane z procesami degradacji tworzyw. Za pracę nad tworzywami biodegradowalnymi otrzymała nagrodę z okazji Dnia Ziemi w kategorii prace naukowo-badawcze przyznawaną przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska w Katowicach. Jest również laureatem nagrody JM Rektora, z okazji Dnia Edukacji Narodowej za wyróżniającą pracę doktorską

Z problemu z ogromną produkcją odpadów w przeciętnej polskiej rodzinie najlepiej i najboleśniej zarażem zdaje sobie sprawę przeciętny polski nastolatek, do którego bieżących obowiązków należy wynoszenie śmieci. „Co, znowu?? Przecież dopiero wynosiłem!” – pada, zazwyczaj emocjonalna, pełna niedowierzania odpowiedź a w młodej głowie rodzi się myśl: „Czy te śmieci nie mogłyby po prostu zniknąć?”. Trudno się dziwić protestom młodego człowieka, gdy się wie, że statystyczny Polak wytwarza rocznie około 350 kg odpadów. Według tych statystyk w czteroosobowej rodzinie do kosza na śmieci trafia ponad 3 kg odpadów dziennie. Trzeba przyznać, że jest co dźwigać. Na wyniesieniu śmieci rola nastolatka się kończy. Po nim śmieciami zajmują się już inne siły fachowe, również dążące do tego, aby śmieci zniknęły.

Najłatwiej o zniknięcie odpadów organicznych. Jak świat światem niestrawione resztki pokarmów, nie-dojedzone posiłki, czy padłe zwierzęta unicestwiane były przez zastępy drobnych organizmów, od bakterii po dżdżownice, które czerpały energię z tego, z czego nie skorzystali inni. Dziś gospodarka odpadowa w tym samym celu buduje kompostownie, które wykorzystują niezmiennie od zarania życia procesy i zjawiska.

„Zniknięcie” szkła czy opakowań metalowych jeśli nawet nie byłoby nierealne, to bardzo długotrwałe. Nie podlegają one biologicznej degradacji, a ich obecność w środowisku może być trzymana w ryzach jedynie poprzez zdyscyplinowanie użytkowników oraz konsekwentny recykling.

Najtrudniej spowodować zniknięcie plastikowych opakowań. Na nikim nie robią już wrażenia informacje, że butelka PET pozostaje w środowisku przez kilkadziesiąt lat, i porównania wyrzuconych rocznie takich butelek, ustawionych jedna na drugiej, do krotności odległości z Ziemi do Księżyca. Spektakularny efekt w przypadku plastików wywołują jednak naukowe wizje mikroorganizmów zdolnych rozkładać plastikowe zanieczyszczenia. Wizje takie, jak można mieć nadzieję, mają szanse się ziścić przy ścisłej współpracy biochemików tworzących plastiki i mikrobiologów, hodujących mikroorganizmy. W skali globalnej efekt byłby dwójaki. Po pierwsze uprzątnęłyby to lasy, przydroża i brzegi rzek, gdzie przypadkowo trafiają opróżnione butelki. Po drugie, dostępne w sklepie za rogiem paczuski z aktywnymi mikroorganizmami rozkładającymi plastikowe – i wszystkie inne – odpady uszczęśliwiłyby nastolatki na całym świecie (przyj. red. z serwisu internetowego [www.us.edu.pl](http://www.us.edu.pl)).

## Wstęp

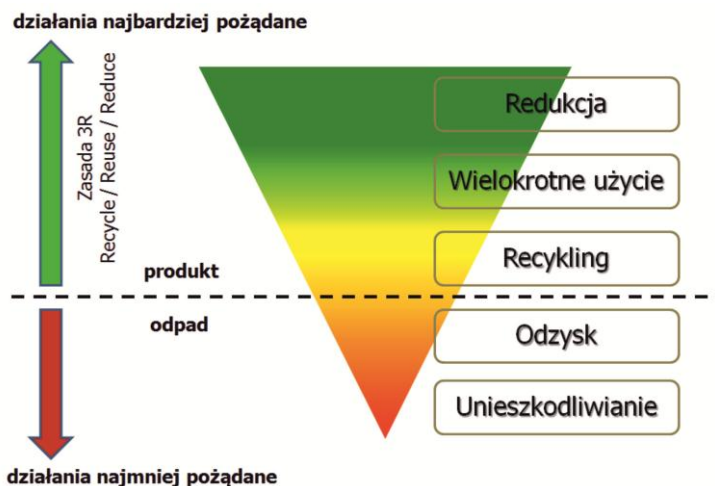
Statystyczny Polak w ciągu roku generuje około 315 kg śmieci. Ten bardzo dobry wynik, świadczący o tym, że Polacy nie stali się jeszcze narodem w pełni nastawionym na konsumpcjonistyczny styl życia, stawia Polskę na 3 od końca miejscu w Europie. Na przeciętnego Europejczyka przypada bowiem 512 kg odpadów, z niechlubnymi, aż 760 kg, przypadającymi na mieszkańca Cypru [Zero Waste..., 2014]. Niestety na tym pochwały się kończą, gdyż okazuje się, że aż 71% naszych odpadów ląduje na wysypiskach śmieci, a jedynie 28% poddawanych jest recyklingowi, w tym kompostowaniu i zaledwie 1% – odzyskowi energetycznemu. W tym samym czasie przeciętny Holender, Niemiec, Belg czy Szwed, generujący w ciągu roku znacznie więcej odpadów, zaledwie 1–2% składowuje na wysypisku, pozostałe 99–98% poddając recyklingowi lub odzyskowi [CEWEP..., 2014; Eurostat..., 2014]. Niechlubnych dla Polski statystyk ciąg dalszy, a mianowicie, przyjmując, że spośród wygenerowanych przez statystycznego mieszkańca 315 kg odpadów zaledwie 255 kg jest zbieranych, można łatwo wyliczyć, że około 2–2,5 tony śmieci ląduje na dzikich wysypiskach śmieci lub w przydomowych piecach, stwarzając realne zagrożenie dla całego ekosystemu [Komunalny.pl, 2014]. Walające się śmieci mogą przecież stać się śmiertelną pułapką dla zwierząt lub zostać przez nie połknięte (Fot. 1), podczas gdy spaliny z odpadów z przydomowych pieców zawierają drażniące, toksyczne i/lub rakotwórcze tlenki siarki, azotu, dioksyny czy furany a pozostający po spalaniu drobny pył – metale ciężkie [IETU..., 2014].



FOT. 1. Wiewiórka w parku bawiąca się szeleszczącym plastikowym kubkiem.  
Fot. B. NOWAK.

### **Główne założenia „śmieciowej dyrektywy”**

Dyrektywa 2008/98/EC [Eur-lex..., 2014], do założeń której powinnyśmy dostosowywać i naszą krajową gospodarkę odpadami, nakłada hierarchię procesów gospodarowania dobrami zaprezentowaną na rysunku 2. Zakłada ona, że zanim produkt stanie się odpadem powinien przejść szereg etapów zwracania do cyklu produkcyjnego i/lub użytkowania. Cykl ten powinien być kontynuowany dla danego materiału w określony sposób i określoną ilość razy dopóki na jego przebieg nie zużyjemy więcej surowców i energii niż produkcja nowych materiałów z surowców pierwotnych. Mottem przewodnim współczesnego, świadomego producenta i konsumenta powinna być zasada zrównoważonego rozwoju.

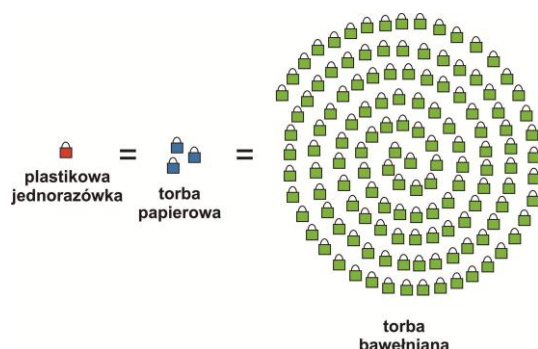


RYS. 1. Hierarchia procesów gospodarowania dobrami. Opracowanie B. NOWAK na podstawie [European Commission..., 2014].

W pierwszej kolejności powinniśmy pomyśleć więc o redukcji ilości materiałów, które mogłyby stać się odpadem. Ze strony producentów dóbr realizacja tego celu możliwa jest poprzez stosowanie jak najmniejszej ilości surowców do wytworzenia produktu. Zeszlóroczne nagrody firmy DuPont – jednego z czołowych producentów tworzyw sztucznych na świecie, zostały w większości przyznane za skonstruowanie opakowań, w których ilość użytego materiału została zmniejszona o 20–30% [DuPont Awards..., 2014]. Innym sposobem na realizację redukcji ilości odpadów, aczkolwiek nie związane z oszczędnością surowców, może być pomysł firmy Apple, która zastosowała, rozpuszczalne w wodzie, opakowanie do słuchawek wykonane z tapioki [Apple..., 2014]. Kolejny pomysł na redukcję odpadów to, między innymi, samonaprawiające się niklowe polimery – niedawny wynalazek naukowców z University of Southern Mississippi. Pęknięta obudowa sprzętu elektronicznego nie musi teraz oznaczać konieczności jego wymiany. Czerwony kolor tworzywa oznaczający uszkodzenie znika w ciągu kilku chwil po zaindukowaniu promieniowaniem słonecznym procesów naprawczych [na podstawie serwisu Nauka w Polsce]. My jako konsumenci zobowiązani zostaliśmy nie tylko do świadomych zakupów związanych z wyborem producenta dóbr, ale także do zastanowienia, czy faktycznie potrzebujemy nowych spodni, mebli, telewizora czy samochodu i czy aby na pewno nie można naprawić zakupionych wcześniej produktów co pozwoli na zaoszczędzenie surowców i energii nie tylko do jego wytworzenia ale także dystrybucji.

Kolejnym proponowanym sposobem ograniczenia ilości zużywanych surowców pierwotnych jest zasada wielokrotnego użycia dóbr. Tam, gdzie jest to możliwe

zwracajmy opakowania szklane. Wytrzymałe szkło jest idealnym materiałem wielokrotnego użytku gdyż bez szkody dla jego funkcjonalności można go poddawać różnym zabiegom mycia i sterylizacji. Materiały szklane są o wiele bezpieczniejsze niż np. wykorzystywane wielokrotnie butelki z PET-u, który jako materiał porowaty chłonie substancje, smaki i zapachy a jednocześnie, przy niskiej odporności na metody sterylizacji, ulega szybkiej degradacji [BEGLEY i in., 2003]. W domu staramy się używać wielokrotnie wszelkich przedmiotów a szczególnie tych, do produkcji których użyto surowców takich jak drewno czy tkaniny naturalne. Dlaczego? Pomocny może się okazać przykład zwykłych toreb na zakupy. Przeciętny zapytany na ulicy respondent nie wie, że biorąc pod uwagę ocenę cyklu życia (LCA) oceniającą wpływ na zdrowie, środowisko czy zużycie zasobów naturalnych do produkcji toreb codziennego użytku bardzo niekorzystnie przedstawia się torba papierowa czy bawełniana w stosunku do grubych toreb z polipropylenu. Skąd ten niekorzystny bilans? Nie tylko z użycia przy produkcji materiałów na torby papierowe czy bawełniane szeregu związków chemicznych szkodliwych dla ekosystemu ale również ze zbyt krótkiego okresu ich użytkowania. Torba papierowa, z reguły po maksymalnie 2 użytkowaniach, trafia do śmietnika, podczas gdy wytrzymałej torby polipropylenowej używamy przeciętnie 66 razy [ŻAKOWSKA i in., 2013]. Czy jednak wytrzymałe torby tworzywowe czy bawełniane są lepszą opcją niż popularne jednorazówki? W związku z planowanym przez Unię Europejską wprowadzeniem do 2020 roku ograniczeniem lub całkowitym zakazem stosowania plastikowych jednorazówek, również Agencja Ochrony Środowiska w Wielkiej Brytanii podjęła się oceny cyklu życia (LCA) takich produktów. Wynika z niej jednoznacznie, że aby zrównoważyć ilości gazów cieplarnianych związanych z produkcją 1 jednorazowej torby plastikowej użytej 1 raz, torba papierowa musi być użyta aż 3 razy, a torba bawełniana aż 133 razy (Rys. 2). Gdy każdą taką plastikową jednorazówkę postanowimy, wbrew nazwie i przeznaczeniu, użyć po raz drugi, nawet jako wyściółki do kosza na odpadki zamiast worka, to ilość koniecznych dla zrównoważenia wpływu na środowisko użyć torby papierowej wzrośnie do 7, a torby bawełnianej do 327 razy [BBC News..., 2014].



RYS. 2. Porównanie „odcisku węglowego” toreb. Opracowanie B. NOWAK na podstawie [BBC News..., 2014].

Biorąc pod uwagę jednak kilkusetkrotnie dłuższy czas rozkładu typowych plastików w środowisku, w porównaniu z materiałami wykonanymi z papieru, celem do znalezienia złotego środka zrównoważonego rozwoju nie wydaje się jednak używanie tylko określonych materiałów, a używanie każdego z dostępnych ale tak długo i tak wielokrotnie jak się tylko da. Za czołowe miejsce w Europie pod względem ilości zużywanych jednorazówek powinniśmy stanąć do poprawki. Statystyczny Polak zużywa ich przeciętnie 450, Niemiec – 70 a Duńczyk tylko 4 [KRAWCZAK, 2013].

W myśl nowej dyrektywy przez recykling rozumie się powtórne przetwarzanie, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach. Wśród podstawowych form recyklingu wyróżnia się recykling materiałowy, surowcowy i organiczny.

W recyklingu materiałowym odzyskujemy materiał jako taki, czyli na przykład papier w postaci makulatury, szkło w postaci stłuczki szklanej (butelki ze szkła poddajemy wielokrotnemu użyciu), metale w postaci np. zgniecionych puszek czy zużytych kabli miedzianych oraz tworzywa sztuczne ze zużytych toreb, kubków, butelek itp.

Z ciekawszych zastosowań recyklowanego papieru wyróżnić można butelki na wino PaperBoy [Greener Package..., 2014], czy zupełnie nowatorskie butelki na wodę Paper Bottle 360 [Gizmag..., 2014]. Absolutnie szalowym przykładem recyklingu opakowań papierowych jest Tajlandzka restauracja „Carton King Creativity Park”, w której większość ścian, mebli, dekoracji i naczyń zrobiona jest z tektury [Carton King, 2014]. Warto w tym miejscu wspomnieć również o problemach z recyklingiem papierowych kartoników na soki, gdyż oprócz papieru zawierają one wyściółkę z kilku warstw tworzywa sztucznego oraz aluminium, które przed procesem recyklingu należy rozdzielić, a nie każda sortownia ma takie możliwości. Międzynarodowy projekt BioBoard zmierza do poprawy recyklowalności takich kartoników poprzez zastąpienie tworzyw sztucznych nieprzepuszczalną powłoką pozyskiwaną z odpadów naturalnych. Potencjalnymi surowcami miałyby być 20 milionów ton serwatki, 65 ton białek z soków owocowych i 140 ton pulpy ziemniaczanej pozostałej po ekstrakcji skrobi, które to niewykorzystane w inny sposób, corocznie trafiają na wysypiska śmieci [Bioboard..., 2014].

Stłuczkę szklaną wykorzystuje się głównie do wyrobu szklanych butelek czy słoików oraz w budownictwie. Warto wspomnieć, że w 2013 roku recykling stłuczki szklanej w UE wyniósł aż 70%, co oznacza zawrócenie do cyklu produkcyjnego szkła z około 25 mld butelek. Pozwoliło to na zaoszczędzenie surowców pierwotnych, które wystarczyłyby na zbudowanie 2 egipskich piramid [KRAWCZAK, 2014].

Tworzywa sztuczne, ze względu na duży stosunek powierzchni do masy, powodujący, że są bardziej widoczne dla oka niż inne materiały, uważane są za główny odpad zaśmiecający przyrodę. Podarte, wysuszone, przezroczyste, plastikowe jednorazówki walające się po marokańskich pustyniach i przedmieściach sprawiają wręcz wrażenie podstawowego składnika krajobrazu (Fot. 2).



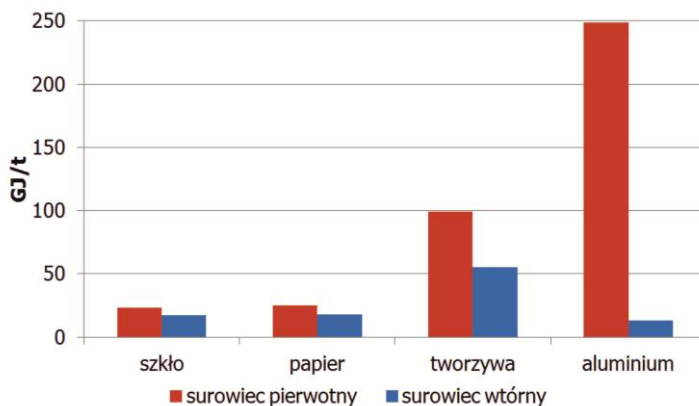


FOT. 2. Marokański krajobraz z plastikiem w tle. Fot. B. NOWAK.

Wiedząc jednak, że węgiel zawarty w odpadach tworzywowych wyrzuconych do środowiska nie zostanie przyswojony przez mikroorganizmy i włączony w naturalny obieg przyrody przez co najmniej kilkaset lat, recykling pozwalający na ich przetworzenie i wykorzystanie wydaje się jednym z podstawowych źródeł oszczędności zarówno surowcowych, energetycznych jak i obszarowych.

Lista produktów z recyklowanych tworzyw jest długa, począwszy od kanistrów, folii drenujących, ekranów tłumiących hałas, wiat przystankowych, wyposażenia samochodów, węży, pacholków taśm, mebli, dywanów, poduszek i ubrań.

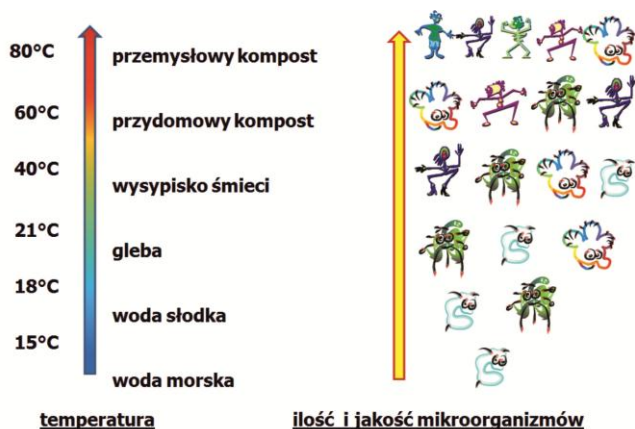
Pod względem oszczędności wynikających z recyklingu aluminiowe puszki nie mają sobie równych (Rys. 3). Oszczędności energii niezbędnej na przetworzenie aluminiowego recyklatu, w porównaniu z produkcją puszki *de novo*, sięgają aż 90% i są około 4 razy większe niż oszczędności wynikające z recyklingu tworzyw i aż 20 razy większe niż oszczędności wynikające z recyklingu szkła. Drogi czytelniku czy wiedziałeś, że oddając do recyklingu tylko 1 puszkę aluminiową oszczędzasz energię niezbędną do zasilania 100W żarówki przez 24 godziny? A gdy zsumujemy energię zaoszczędzoną poprzez recykling wszystkich najpowszechniej stosowanych metali, takich jak ołów, cyna, żelazo, miedź, tytan, nikiel, glin i cynk można nią zasilić 20 milionów domostw przez cały rok [Allconnect..., 2014].



RYS. 3. Oszczędność energii wynikająca z recyklingu podstawowych odpadów. Opracowanie B. NOWAK na podstawie [Recycling..., 2014] oraz [The Aluminium..., 2014].

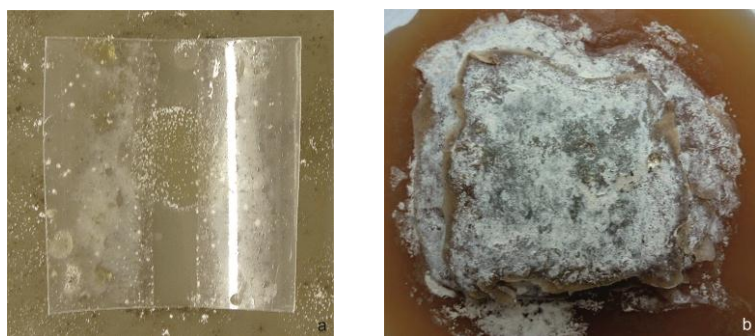
Osobną kategorię przetwarzania odpadów w produkty stanowi recykling organiczny w formie beztlenowej fermentacji lub kompostowania. Głównym substratem biogazowni bazujących na procesach fermentacji są jednak produkty przemysłu rolniczego, takie jak kiszonki roślinne, wysłodki czy gnojowica. Sposobem na utylizację odpadów komunalnych, które ulegają biodegradacji jest kompostowanie. Produktem użytkowym pozyskiwanym w procesie kompostowania jest humus a produktem ubocznym –  $\text{CO}_2$ , natomiast przydatnymi produktami fermentacji są zarówno  $\text{CH}_4$  jak i osad pofermentacyjny stanowiący cenne źródło mikro- i makroelementów dla celów rolniczych.

Błędnym założeniem przeciętnego Kowalskiego jest to, że produkty nadające się do kompostowania to takie, które można bezkarnie wyrzucić do środowiska gdzie łatwo i szybko ulegną rozkładowi. Warto pamiętać, że proces biodegradacji przez mikroorganizmy to nic innego niż proces chemiczny, w którym głównym katalizatorem ułatwiającym rozkład materii są enzymy. Szybkość procesów chemicznych i biochemicznych zależy w dużej mierze od chemiczno-fizycznych warunków środowiska: stężenia tlenu, pH, wilgotności, temperatury i oczywiście parametrów biologicznych takich jak ilość i jakość mikroorganizmów. Choćby z tego względu można przewidywać, że inaczej będzie przebiegał proces biodegradacji w kompoście, a inaczej w zbiornikach wodnych (Rys. 4).

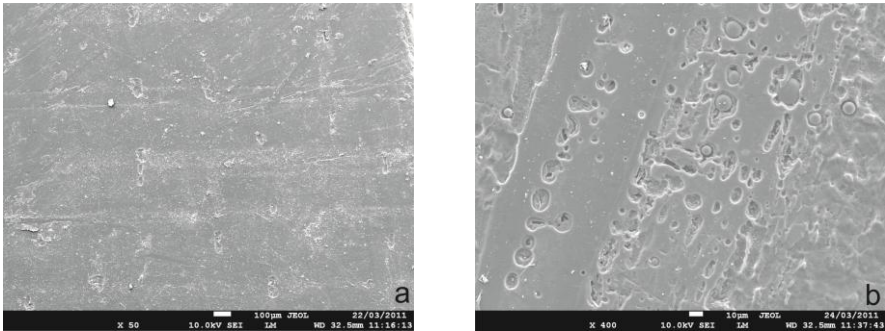


RYS 4. Szybkość procesu biodegradacji zależy od warunków środowiska. Opracowanie B. NOWAK.

Co zatem nadaje się do procesu kompostowania? Procesowi temu, oprócz odpadów zielonych, można poddać specjalnie oznakowane tworzywa. Certyfikat na kompostowalność oznacza, że dowiedziono, że dla danego typu tworzywa, w warunkach kompostowania przemysłowego, czas jego rozkładu jest porównywalny do czasu trwania cyklu kompostowania a proces ten przebiega zgodnie z obowiązującymi normami. Należy pamiętać o tym, że tworzywa do kompostowania przydomowego powinny posiadać certyfikat, świadczący o tym, że rozłożą się w niższej temperaturze procesu degradacji. Tworzywa kompostowalne zakopane w glebie bądź wyrzucone na wysypisko śmieci, z powodu nie zachowania wymagań środowiska degradacji, mogą w nie zmienionej formie, przez kilka lat, stanowić poważne zagrożenie dla flory i fauny tych środowisk (Fot. 3 i 4).











Fot. 3. Porównanie szybkości biodegradacji i zasiedlania folii kompostowalnej przez mikroorganizmy w: a) warunkach mezofilnych 40°C; b) termofilnych 55°C. Badania B. NOWAK. Fot. B. NOWAK.



FOT. 4. Porównanie szybkości degradacji PET w: a) warunkach mezofilnych 40°C; b) termofilnych 55°C. Badania B. NOWAK. Fot. E. TALIK.

Podobnie, tworzywa posiadające wyłącznie certyfikaty biodegradowalności (czy to w glebie czy wodzie) nie są przeznaczone do kompostowania, ponieważ ze względu na skład lub mechanizm degradacji mogą poważnie zaburzyć ten proces. Przykłady oznakowania tworzyw kompostowalnych i biodegradowalnych prezentuje tabela 1.

TAB. 1. Przykłady oznakowania tworzyw kompostowalnych i biodegradowalnych. Opracowanie B. NOWAK na podstawie [Din Certo, 2014] oraz [Vinçotte..., 2014].

Proces degradacji	kompostowanie		biodegradacja	
	przemysłowe	domowe	gleba	woda
Symbole				
	 	 		

Dopiero gdy wyczerpiemy już wszystkie możliwości powtórnego wykorzystania czy recyklingu materiałów, procesy te okażą się być na danym terenie nieopłacalne lub też dysponujemy odpadami zmieszanymi w stopniu uniemożliwiającym rozdzielenie to wtedy, w procesie odzysku energetycznego, możemy odzyskać

przynajmniej część energii włożonej w wyprodukowanie towarów, które stały się odpadami. Spalaniu można poddać jednak jedynie te z odpadów, których wartość opałowa przewyższa ilość energii włożoną w sam proces ich spalania. I tak, proces ten jest zupełnie nieopłacalny dla papieru (16 GJ/t) czy drewna (15 GJ/t), natomiast ma sens przy spalaniu tworzyw sztucznych, gdyż ich wartość opałowa, kształtująca się w granicach 30–45 GJ/t przewyższa węgiel i dorównuje ilości energii pozyskanej ze spalania gazu ziemnego lub oleju opałowego [KOZERA–SZALKOWSKA, 2013].

Ostatnim i najmniej pożądanym kierunkiem zagospodarowania odpadów jest ich składowanie na wysypiskach śmieci. Powinny tu trafiać odpady, których nie udało się wydzielić z recyklingu, dla których recykling energetyczny jest nieopłacalny oraz wszelkie tworzywa oznakowane jako degradowalne, z wyłączeniem tworzyw kompostowalnych. Jeżeli uda się w Polsce osiągnąć zakładane przez Dyrektywę unijną wskaźniki, to do 2020 roku mamy składować nadal do 35% odpadów. Warto więc pomyśleć o tym, żeby tak zutylizowane materiały zajmowały jak najmniej miejsca na wysypiskach. Rozwiązaniem kompromisowym pomiędzy recyklingiem a składowaniem są więc np. tworzywa degradowalne. Materiały takie, powinny w krótkim czasie ulec tzw. oksofragmentacji lub biodegradacji pozwalając na zmniejszenie objętości odpadów na składowiskach.

## Mikroorganizmy i polimery

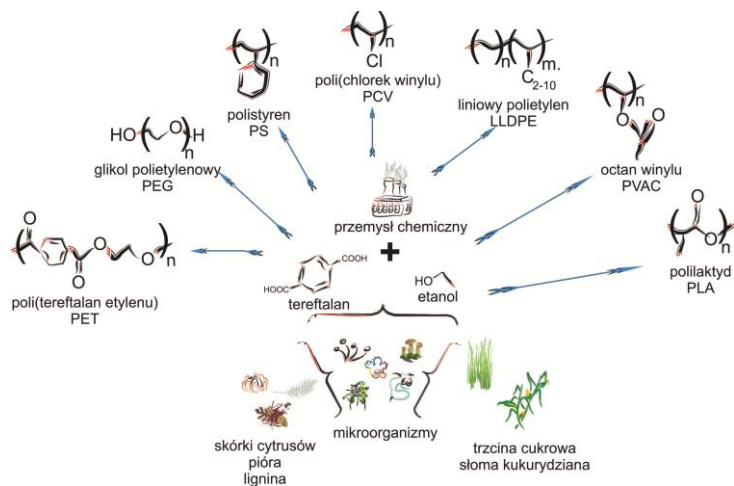
*„Mikroorganizmy mogą i zrobią wszystko: są sprytniejsze, mądrzejsze i potężniejsze niż mikrobiolodzy, chemicy, inżynierowie i inni...”*

PERLMON D. [1980]

## Synteza

Od czasu udoskonalenia metod pozyskiwania tworzyw syntetycznych na skalę przemysłową ich popularność i ilość różnorodnych zastosowań nieprzerwanie rośnie. Pod koniec XX wieku zaczęliśmy zdawać sobie jednak sprawę, że ilość kopalnych surowców naturalnych, z których są one pozyskiwane, w niedługim czasie skończy się, a lata deficytu i racjonowania ropy naftowej będą skutkować nadmiernym wzrostem cen produktów ropopochodnych. Zaczęto więc poszukiwania alternatywnych materiałów, które cechowałyby się zarówno zbliżonymi do tworzyw właściwościami użytkowymi jak i obojętnością fizjologiczną a zarazem podobną ekonomicznością. Ponieważ tworzywa okazały się materiałem praktycznie unikatowym i niezastąpionym, w następnej kolejności zaczęto poszukiwać alternatywnych metod ich pozyskiwania. Sięgnięto do pomysłu rodem z Indii, gdzie już w latach 40. XX wieku próbowano, na niewielką skalę, wytwarzać polietylen z surowców roślinnych. Pomysł był następujący: skoro nie możemy przyspieszyć procesów powstawania ropy naftowej o – bagatela – milion lat, to spróbujmy pozy-

skać polimery z odnawialnych i łatwo dostępnych półproduktów. Substratem, z którego bezpośrednio pozyskuje się polietylen jest eten, który powstaje w wyniku dehydratacji etanolu, którego pozyskiwaniem człowiek trudnił się od wieków, począwszy od niskoprocentowych 1-dniowych napojów fermentowanych do spirytusu o 96 % zawartości tego składnika. Wszystkie metody pozyskiwania etanolu łączy jedno – wykorzystanie na pewnych etapach produkcji różnorodnych mikroorganizmów. W zależności od rodzaju substratu oraz gatunku mikroorganizmów wydajność procesu jest różna. Obecnie wiemy, że najbardziej wydajnymi i odpornymi na większe ilości alkoholu w środowisku reakcji nie są powszechnie stosowane drożdże gorzelnicze (*Saccharomyces cerevisiae*), a bakterie *Zymomonas mobilis* wyizolowane po raz pierwszy z soku z agawy. Wiodącym światowym producentem etanolu z roślin jest Brazylijski koncern Braskem, który z hektara upraw trzciny cukrowej pozyskuje na drodze procesów mikrobiologicznych około 7 200 l etanolu, a z nich, metodami chemicznymi – 3 tony tak zwanego zielonego polietylenu [Braskem, 2014]. Obecnie dzięki zaawansowanym technikom inżynierii genetycznej i bioprosesowej udało się zoptymalizować procesy wytwarzania etanolu i innych półproduktów tworzyw nie tylko z sacharozy, ale także z wielu materiałów odpadowych, takich jak pióra czy skórki z pomarańczy [MATHERS, 2012]. Przyszłe prognozy uspokajają, że areal ziem uprawnych przeznaczonych na hodowlę roślin jako surowców do tej formy pozyskiwania tworzyw nie powinien przekroczyć 0,02%, co nie wpłynie na zdolność produkcyjną żywności. Przykłady surowców i „zielonych” produktów polimerowych pozyskiwanych przy udziale mikroorganizmów przedstawiono na rysunku 5.



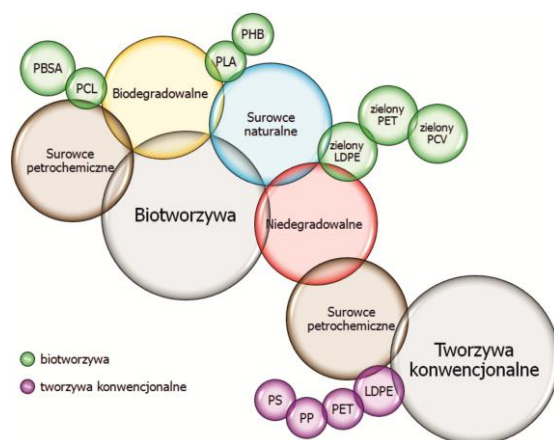
Rys. 5. Przykłady zielonych polimerów pozyskiwanych dzięki współdziałaniu biotechnologii i chemii. Opracowanie B. NOWAK.



Czy taki zielony polietylen, polipropylen, poli(tereftalan etylenu) czy polistyren różnią się od swoich odpowiedników z tworzyw konwencjonalnych? Otóż jedyną różnicą jest obecność w tych pierwszych izotopu węgla  $^{14}\text{C}$  świadczącego o tym, że węgiel do ich produkcji pochodzi ze źródeł bieżących a nie kopalnych. Izotop  $^{14}\text{C}$  jest niewykrywalny w tworzywach z ropy naftowej, w której, na skutek kilkuset tysięcy lat przemian chemicznych, uległ rozpadowi.

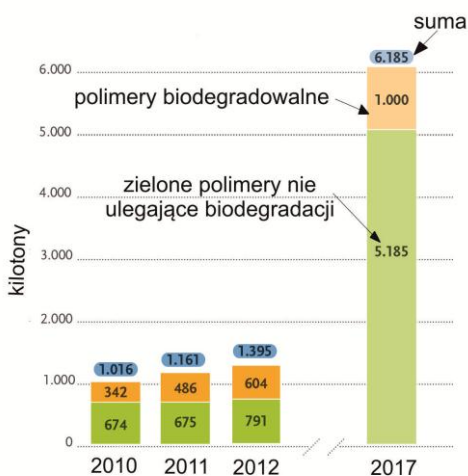
Zielone polimery przydatne do recyklingu materiałowego i/lub chemicznego mogą zatem zostać użyte do wytworzenia nie tylko reklamówek ale też ubrań, mebli, okien czy części samochodów.

Interesujące jest to, że ze względu na to, że jednym z substratów do produkcji „zielonych” polimerów, będących odpowiednikami tworzyw konwencjonalnych, są surowce odnawialne, uzyskały one status biotworzyw [Plastic..., 2014]. Jeszcze niedawno termin biotworzywo oznaczał specjalną wydzieloną grupę tworzyw wyróżniających się określoną cechą – w domyśle biodegradowalnością. Obecnie, w tej grupie znajdują się polimery zarówno biodegradowalne, jak i zupełnie trwałe, polimery pozyskiwane wyłącznie ze źródeł odnawialnych jak i surowców wyłącznie petrochemicznych, polimery syntetyzowane metodami biotechnologicznymi ale też i chemicznymi lub mieszanymi. Informacja na produkcie, np. opakowaniu, że wykonany jest z biotworzywa czy też że jest oparty na produktach naturalnych nie podpowiada konsumentowi, czy tworzywo jest trwałe czy podatne na biodegradację. Wyjątek stanowią biotworzywa oznakowane symbolem polimeru i znakiem określającym przydatność do recyklingu chemicznego, organicznego i/lub biodegradacji. Obecnie jedyną odrębną grupę nie przynależną do biotworzyw stanowią polimery konwencjonalne cechujące się czysto petrochemicznym pochodzeniem oraz odpornością na mikrobiologiczną degradację. Ujęcie biotworzyw wg European Bioplastics przedstawia rysunek 6.



RYS. 6. Biotworzywa vs tworzywa konwencjonalne. Opracowanie B. NOWAK na podstawie danych European Bioplastics.

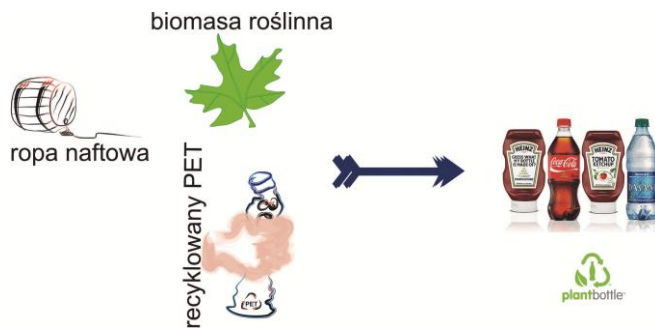
Rosnące zapotrzebowanie nie tylko na trwałe, nie ulegające degradacji, tworzywa syntetyczne ale dodatkowo na tworzywa pozyskiwane ze źródeł odnawialnych, wyrażające się w produkcji polimerów pozostawiających mniejszy ślad węglowy, w porównaniu do tworzyw konwencjonalnych, znalazł odzwierciedlenie w prognozach na przyszłe lata. W 2017 roku produkcja takich trwałych ale zielonych biotworzyw w stosunku do 2012 roku ma wzrosnąć przynajmniej 7-krotnie, podczas gdy produkcja tworzyw biodegradowalnych ma wzrosnąć o niecałe 50% (rys. 7a).



Quelle: European Bioplastics | Institut für Biokunststoffe und Bioverbundstoffe (Dezember 2013)

European Bioplastics | ifbb Institut für Biokunststoffe und Bioverbundstoffe

7a



7b

Rys. 7. a) Przeszłe i przewidywane zapotrzebowanie ogólnoświatowego rynku na nie ulegające degradacji i biodegradowalne biotworzywa [European ..., 2014 – zmienione]; b) Hybrydowa butelka z zielonego i konwencjonalnego PET. Opracowanie B. NOWAK.



Przykładem zastosowania w nie ulegającym degradacji produkcji polimerów różnego pochodzenia jest PlantBottle™. Jest to butelka z poli(tereftalanu etyleny), w której od 14 do 30% stanowi, pozyskany drogą mikrobiologiczną z wielocukrów roślinnych, zielony glikol etylenowy, 51% to konwencjonalny PET wprost z ropy naftowej a pozostałą część stanowi PET po recyklingu [Coca-Cola..., 2014] (Rys. 7b).

Innym przykładem polimeru pozyskiwanego, przynajmniej w części procesu produkcyjnego, przy udziale mikroorganizmów jest polilaktyd (PLA). Rolą mikroorganizmów, do których zalicza się bakterie fermentacji mlekowej, jest synteza mleczanu, z którego następnie metodami chemicznymi syntetyzuje się poliester. Polimer ten cechuje się doskonałymi własnościami przetwórczymi, można z niego wytwarzać zarówno butelki, worki, jednorazowe naczynia jak i walizki. Gama produktów oparta o PLA sprzedawana jest pod nazwą NatureFlex. Niestety koszt wytwarzania, wyższy niż tworzyw konwencjonalnych, ogranicza jego powszechne zastosowanie. Istotną cechą PLA jest przydatność do praktycznie każdej formy recyklingu [Nature Flex..., 2014].

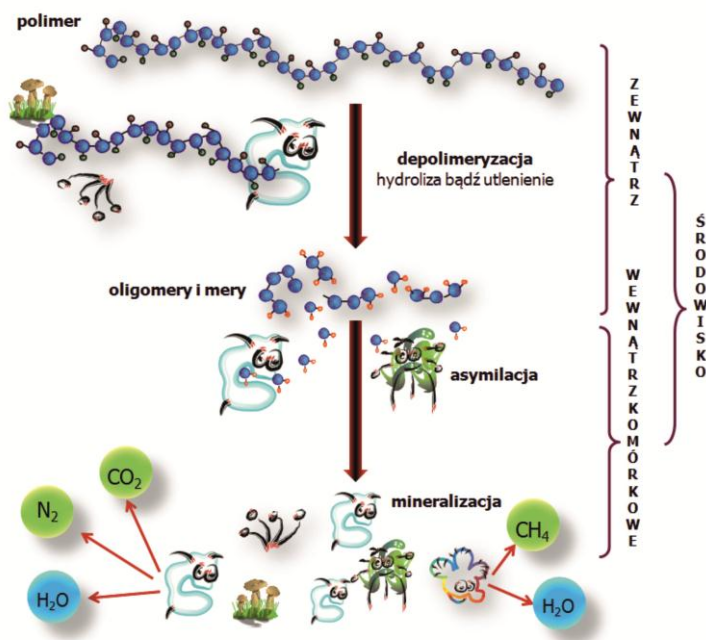
Polimerem pozyskiwanym całkowicie drogą biotechnologiczną z udziałem mikroorganizmów są polihydroksyalkaniany (PHA). Te biodegradowalne poliestry są materiałem zapasowym syntetyzowanym i gromadzonym w cytoplazmie bakterii w warunkach niedoboru składników odżywczych w podłożu. Warto wspomnieć, że substratem do syntezy PHA mogą być nie tylko cukry, ale także zużyty olej stanowiący odpad gastronomii. Zastosowanie inżynierii genetycznej pozwoliło również na wprowadzenie genów odpowiedzialnych za syntezę PHA w szlaki biosyntezy roślin. Pozwoliło to na gromadzenie poliestru w nieprzydatnych do użytku częściach nadziemnych roślin, takich jak łodygi np. kukurydzy. Ze względu na wysoką cenę poliester ten stosuje się głównie do celów medycznych [AMACHE i in., 2013].

Zupełnie odmiennym pomysłem na pozyskanie opakowań z udziałem mikroorganizmów było zastosowanie do ich produkcji jadalnych grzybów. Wsypując do formy w pożądanym kształcie, łusek z ryżu będących odpadem, zaszczipiając je grzybnią i pozostawiając w ciemnym i wilgotnym pomieszczeniu na okres około 7 dni aby grzybnia wypełniła formę, a następnie susząc całkowicie uzyskuje się oparte wyłącznie na surowcach odnawialnych całkowicie biodegradowalne tworzywo przypominające właściwościami fizycznymi styropian. Tworzywo to, pod nazwą EcoCradle, może służyć zarówno jako opakowanie amortyzujące wstrząsy lub jako materiał izolacyjny do ocieplania budynków [Ecovative..., 2014].

Kolejnym ciekawym zastosowaniem mikroorganizmów do syntezy tworzyw jest użycie zewnątrzkomórkowych grzybowych enzymów klasy oksydoreduktaz, takich jak lakaza czy peroksydaza. Te naturalne katalizatory, wydzielane przez grzyby zgnilizny drewna, prowadzą wydajną syntezę żywic polifenolowych z substratów pochodzących z paliw kopalnych lub z odpadów ligninocelulozowych. Zastosowanie enzymów pozwoliło na wyeliminowanie toksycznego formaldehydu ze środowiska reakcji i otrzymanie żywic o odporności termicznej do 1 000°C [MITA i in., 2003].

## Degradacja

Degradacja polimerów w środowisku jest procesem złożonym. Wyróżnia się w nim kilka etapów: depolimeryzację, asymilację i mineralizację. Aby polimer można było nazwać biodegradowalnym przynajmniej jeden z etapów musi być prowadzony przy udziale mikroorganizmów. Mikroorganizmy w obecności tworzywa podatnego na degradację, w sprzyjających warunkach dla ich rozwoju, w obecności tlenu, wilgoci, mikroelementów, w odpowiedniej temperaturze i pH wydzielają zewnątrzkomórkowe enzymy – depolimerazy inicjujące proces degradacji makrocząsteczek, które ze względu na swoją wielkość i ciężar nie mogą być bezpośrednio transportowane do komórek mikroorganizmów. W etapie tym największe znaczenie ma rodzaj wydzielanych przez mikroorganizmy enzymów. Do klasy hydrolaz, zaangażowanych w rozkład tworzyw, należą przede wszystkim esterazy, lipazy, kutynazy, proteazy i amylazy. Do klasy oksydoreduktaz należą enzymy kompleksu lignolitycznego grzybów zgnilizny białej, w skład którego wchodzi kilkadziesiąt różnych enzymów, z czego największe znaczenie mają lakaza, peroksydaza manganowa i peroksydaza ligninowa. Powstałe w wyniku enzymatycznej degradacji mery i oligomery na drodze dyfuzji transportowane przez osłony komórkowe mikroorganizmów i wewnątrz komórki metabolizowane dostarczając im węgla i energii do wzrostu [NOWAK i in., 2003]. Rysunek 8 przedstawia etapy degradacji polimerów.



RYS. 8. Schemat biodegradacji polimerów. Opracowanie B. NOWAK.

W myśl dyrektywy, o której mowa w artykule, optymalnym byłoby przekazywanie zużytych polimerów niedegradowalnych do recyklingu mechaniczno-chemicznego a polimerów kompostowalnych do recyklingu organicznego. Niestety ceny tworzyw konwencjonalnych są od kilku do kilkudziesięciu razy niższe niż polimerów biodegradowalnych. Porównując medianę zarobków obywatela Europy Zachodniej z zarobkami mieszkańców pozostałych Europejskich państw łatwo zgadnąć, który z tych polimerów kupi nie patrząc na ekologiczne konsekwencje. Ponieważ w okresie przejściowym, gdy będziemy nasze ustawy śmieciowe dostosowywać do wymogów unijnych i nadal duża część tworzyw będzie trafiać na wysypiska śmieci, ważne jest wprowadzenie na rynek tworzyw, które będą wynikiem kompromisu ekonomicznego i ekologicznego.

Tanie polimery hydrofobowe o łańcuchu czysto węglowym, takie jak LDPE, są niedostępne dla mikroorganizmów i wydzielanych przez nie enzymów. Dlatego też należało pomyśleć w jaki sposób można je zmodyfikować aby zwiększyć podatność na mikrobiologiczną degradację, tak aby po trafieniu na wysypisko śmieci uległy szybszej fragmentacji i zajmowały jak najmniej miejsca.

W Katedrze Biochemii UŚ od lat prowadzi się badania nad tworzywami biodegradowalnymi oraz oceną zdolności mikroorganizmów do ich rozkładu.

Jednym z badanych polimerów był alifatyczny kopolimer kwasów bursztynowego i adypinowego z glikolem butylenowym (PBSA), który w obecności wyizolowanych ze środowiska mikroorganizmów ulegał całkowitej biodegradacji. Badania wykazały ponadto, że bakterie intensywnie tną łańcuchy polimerowe, same w niewielkim stopniu asymilując powstałe oligomery i mery (Fot. 5a). Rolę organizmów asymilujących i przekształcających polimer w CO<sub>2</sub> pełniły jednak grzyby mikroskopowe (Fot. 5b) [NOWAK, 2006].

Podjęto również próbę modyfikacji polimerów konwencjonalnych, takich jak polietylen (LDPE) i poli(tereftalan etylenu) (PET), poliestrem PBSA. Wyniki okazały się bardzo obiecujące, gdyż 60% dodatek poliestru powodował, że mikroorganizmy w warunkach laboratoryjnych były w stanie całkowicie degradować polietylen w ciągu zaledwie 90 dni [ŁABUŻEK i in., 2002] (Fot. 5c). Badania przeprowadzone glebie, przy niższej temperaturze i wilgotności procesu wykazały, że kompozycja ulegała degradacji w przeciągu około 2 lat [NOWAK i in., 2011] (Fot. 5d). Zupełnie inne wyniki uzyskano po modyfikacji PET-u gdyż jego obecność całkowicie zahamowała proces biodegradacji kompozycji zawierającej 50% PET i 50% PBSA (Fot. 5e). Najprawdopodobniej, PET zawierający w łańcuchu grupy aromatyczne oraz, w przeciwieństwie do polietylenu, o wyraźnej strukturze krystalicznej, objawiającej się uporządkowaniem łańcuchów polimerowych okazał się zbyt sztywny aby dopasować się do elastycznych centrów aktywnych mikrobiologicznych enzymów [NOWAK i in., 2011]. Dopiero podwyższenie temperatury procesu biodegradacji do 55°C spowodowało większą ruchliwość łańcuchów PET i umożliwiło niewielki rozkład kompozycji. Strzałem w dziesiątkę okazało się jednak zastosowanie do procesu degradacji nie bakterii ani grzybów mikroskopo-

wych, a grzybów wywołujących białą zgniliznę drewna takich jak *Phanerochaete chrysosporium*, *Ganoderma lucidum*, *Panus tigrinus* lub *Pleurotus ostreatus* (Fot. 5f). Mikroorganizmy te w naturze uczestniczą w procesach rozkładu ligniny, która jest aromatycznym polimerem o nikłej podatności na biodegradację. Ich zastosowanie spowodowało utlenienie łańcuchów polimerowych, które stały się bardziej hydrofilowe oraz obniżyło krystaliczność tworzywa i zwiększyło podatność kompozycji na późniejszą hydrolizę z udziałem bakterii i grzybów oraz rozkład w glebie.

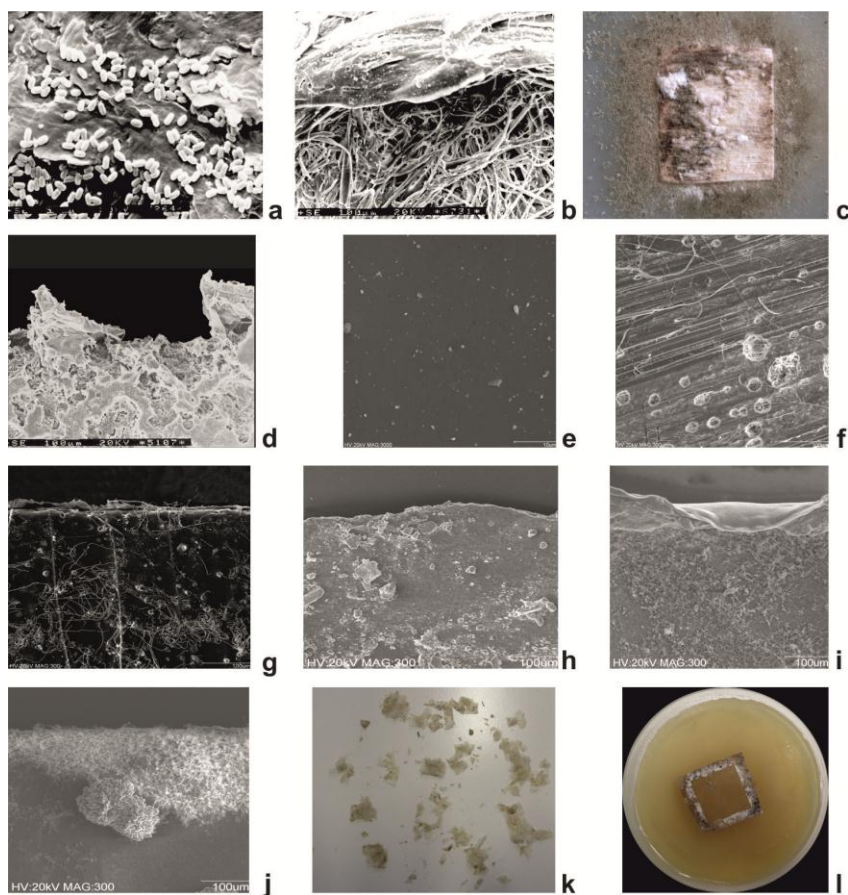
Przykładem innych badanych kompozycji, których podatność na biodegradację zwiększyła się były polimery skrobiowo-polietylenowe. Tworzywa w wyniku działania mikroorganizmów ulegały fragmentacji ale w przeciwieństwie do poprzednich – rozkładowi ulegała tylko skrobia a polietylen pozostawał nietknięty (Fot. 5g). Wywnioskowano zatem, że skrobia nie jest dobrym wypełniaczem do polietylenu, gdyż nie indukuje wytwarzania przez mikroorganizmy enzymów utleniających ten odporny na rozkład polimer [NOWAK i in., 2010].

Kolejnym badanym polimerem był wspomniany wcześniej kompostowalny polilaktyd (PLA). Polimer jest bardzo ciekawy i pomimo, że badany już od wielu lat, mechanizm jego degradacji wciąż pozostaje zagadką. To co nie ulega wątpliwości to fakt, że w wysokiej temperaturze i w środowisku o dużej zawartości wody, takim jak np. kompost ulega on szybkiej degradacji hydrolitycznej. Rozpad polimeru pod wpływem wody do niewidocznej gołym okiem postaci oligomerów i merów wydaje się niezbędny do asymilacji i mineralizowania przez mikroorganizmy. Gdy PLA trafi nie do kompostu a np. do gleby, gdzie panują niższe temperatury i wilgotność, to nie ulegnie rozpadowi, bo znanych jest tylko kilka mikroorganizmów na świecie zdolnych do rozkładu wysokocząsteczkowego PLA [NOWAK i in., 2010]. Na fotografiach wyraźnie widać, że w glebie PLA jest niechętnie zasiedlane przez mikroorganizmy (Fot. 5h). Inaczej przedstawia się sytuacja gdy biodegradacji poddamy PLA, który był już wcześniej poddany procesowi recyklingu mechanicznego – taki rPLA, o krótszych łańcuchach polimerowych jest zarówno degradowany jak i metabolizowany przez mikroorganizmy (Fot. 5i). Dlatego też w kolejnym etapie podjęto próbę zbadania czy obecność rPLA pomoże w szybszej fragmentacji folii polietylenowych modyfikowanych tym poliestrem. Po 90 dniach inkubacji z mikroorganizmami kompostowymi okazało się, że rPLA był całkowicie usuwany z tworzywa a pozostały polietylen ulegał utlenieniu (Fot. 5j).

W ostatnich latach, na rynku polskim pojawiły się jednorazowe reklamówki opatrzone napisem „oksybiodegradowalny”. Reklamówki te, oprócz konwencjonalnych trwałych polimerów, takich jak polietylen lub polipropylen, zawierają również specjalne dodatki, takie jak d<sub>2</sub>w, AddiFlex czy TDPA, składające się przede wszystkim lub między innymi ze stearynianów metali [AMMALA i in., 2011]. Dodatki te miały, w trakcie użytkowania reklamówki przez konsumenta oraz po wyrzuceniu na śmietnik, pod wpływem temperatury i promieniowania słonecznego, spowodować utlenienie (stąd przedrostek „oksy”) i fragmentację tworzyw. Od kilku lat emocje wzbudzał drugi z przedrostków, a mianowicie „bio”. W naszych badaniach dodat-

kowo wykazano, że mikroorganizmy „uciekają” przed takimi polimerami (Fot. 5k). Małe nie tylko ilość ale i różnorodność mikroorganizmów w ich otoczeniu, jednoznacznie wskazując na to, że takie polimery nie tylko nie ulegają degradacji biologicznej ale wręcz szkodliwie oddziałują na mikroflorę środowisk.

Coraz więcej ośrodków naukowych odradza stosowanie przedrostka „bio”, a stowarzyszenie European Bioplastics wręcz proponuje zmianę nazwy na tworzywo ulegające „oksyfragmentacji”, tak aby mechanizm rozpadu nie kojarzył się nawet z typową degradacją. Niewątpliwą zaletą tych tworzyw jest szybka fragmentacja tak, że zajmują mniej miejsca na wysypiskach śmieci, gdzie powinny być składowane (Fot. 5l).

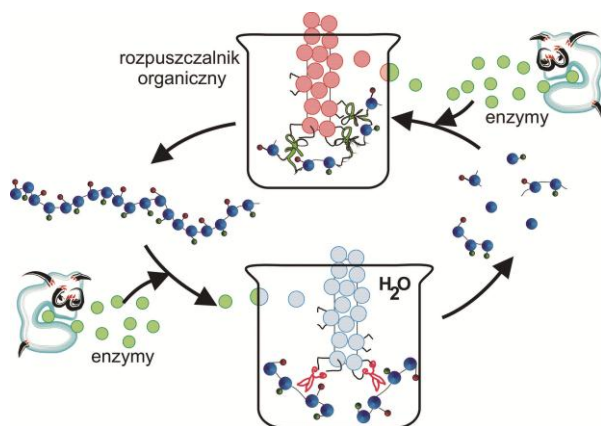


FOT. 5. Biodegradacja folii: a) i b) PBSA; c) i d) kompozycji LDPE/PBSA; e) i f) kompozycji PET/PBSA; g) kompozycji LDPE/skrobia; h) i i) PLA; j) kompozycji LDPE/PLA; k) i l) folii ulegającej oksyfragmentacji. Fot. B. NOWAK i J. KARCZ.

## Recykling

Wiedząc, że mikroorganizmy mogą syntetyzować i degradować polimery zarówno w środowisku zewnątrz- jak i wewnątrzkomórkowym zadano kiedyś pytanie, czy można by je wykorzystać w procesie recyklingu surowcowego. Taka forma recyklingu to przecież nic innego jak tylko rozpad polimeru na mery. Mery jednak, w przeciwieństwie do procesu biodegradacji, powinny pozostać w środowisku reakcji tak, aby można było z nich wysyntetyzować kolejny polimer. Okazało się, że w tym celu wystarczy zastosować nie całe mikroorganizmy, a jedynie wydzielane przez nie enzymy.

Enzymy jako katalizatory, obniżając energię aktywacji reakcji chemicznej, są zdolne do przyspieszenia przebiegu reakcji. To, czy równowaga procesu przesunie się w stronę syntezy, czy też degradacji zależy w dużym stopniu od warunków katalizy. Spośród enzymów to właśnie hydrolazy uczestniczące w syntezie i degradacji polimerów charakteryzują się największą elastycznością co do aktywności w różnych warunkach procesu. Aby przesunąć równowagę procesu w kierunku syntezy polimerów, reakcje z udziałem hydrolaz prowadzić należy w hydrofobowym środowisku organicznym, podczas gdy do zajścia procesu degradacji wymagane jest środowisko wodne. Wyobraźmy sobie białka enzymatyczne „przyczepione” do specjalnych nośników. Gdy taki kompleks przeniesiemy do  $H_2O$ , enzymy będą degradować polimer, gdy przeniesiemy kompleks do rozpuszczalnika organicznego – będą go syntetyzować (Rys. 9).



RYS. 9. Recykling enzymatyczny poliestrów. Opracowanie B. NOWAK.

Kolejną ważną cechą hydrolaz jest to, że w przeciwieństwie do np. oksydoreduktaz, do działania nie wymagają dodatkowych czynników, tzw. kofaktorów, które musiałyby znaleźć się w środowisku reakcji powodując również konieczność ich recyklingu. W przeciwieństwie do recyklingu typowo chemicznego ogromną zaletą zastosowania specyficznych enzymów, jest możliwość syntetyzowania polimerów

lub ich degradowania do cząsteczek o tej samej i określonej długości. W procesie katalizy chemicznej uzyskany produkt jest zazwyczaj mieszaniną różnych cząsteczek [MROZIK i in., 2008].

Spośród mikroorganizmów, z których można pozyskać lipazy do procesu recyklingu poliestrów alifatycznych i alifatyczno-aromatycznych wymienia się bakterie rodzaju *Pseudomonas*, *Burkholderia* oraz grzyby *Candida cylindracea*, *Candida antarctica* czy *Rhizopus miehei* [MATSUMURA i in., 1996; GÜBITZ i in., 2003].

## Podsumowanie

Czy ustawa śmieciowa zagrozi mikroorganizmom? A może to mikroorganizmy stoją na przeszkodzie funkcjonowania dyrektywy. Odpowiedź brzmi – ani jedno ani drugie. Mikroorganizmy, dzięki możliwości zapadania w stan uśpienia i wytwarzania przetrwalników, zdolności do wymiany genów między sobą czy też pobierania ich ze środowiska, niezwyklej tempu namnażania oraz ogromnej różnorodności i wielkości populacji sięgającej, w sprzyjających warunkach, nawet trylioną komórek w 1 gramie gleby czy kompostu, są w stanie przystosować się do wielu zmian w otoczeniu, w tym wywołanych działalnością człowieka. Do dnia dzisiejszego poznaliśmy nie więcej niż kilka procent mikroorganizmów zamieszkujących wszelkie strefy klimatyczne i ekosystemy od skutej lodem Arktyki po gorące gejzery, szczyty gór o rozrzedzonym powietrzu po Rów Mariański z ciśnieniem środowiska zdolnym miażdżyć łodzie podwodne. Powinniśmy poznawać je lepiej i wykorzystać ich potencjał tak, aby służyły przyrodzie i człowiekowi. Kilkadziesiąt lat temu wydawało się, że kończy się era tworzyw sztucznych – dzisiaj, dzięki właśnie mikroorganizmom, przemysł polimerowy przeżywa renesans. Wytwarzając coraz więcej dóbr, zadbajmy jednak o to aby znalazł się sposób ich bezpiecznej utylizacji. W artykule pokazano, że mikroorganizmy można wykorzystać nie tylko do syntezy ale również do recyklingu jak i rozkładu surowców odpadowych, które dzięki odpowiedniemu zagospodarowaniu, ponownie stają się cennym surowcem. Pamiętajmy więc, że aby zmaksymalizować rolę mikroorganizmów w usuwaniu śmieci, przeznaczając odpady do recyklingu organicznego nie umieszczając wśród nich nie przeznaczonych do kompostowania worków i reklamówek. Podobnie, tworzyw kompostowalnych i biodegradowalnych nie wyrzucamy do środowiska, gdyż zanim się rozłożą będą stanowić takie samo zagrożenie dla zwierząt jak zwykła plastikowa jednorazówka.

## Piśmiennictwo

1. AMACHE R., SUKAN A., SAFARI M., ROY I., KESHAVERZ T. 2013: Advances in PHAs Production. Chem. Eng. Trans. 32: 931–936.
2. AMMALAA A., BATEMANA S., DEANA K., PETINAKISA E., SANGWANA P., WONGA S., YUANA Q., YUA L., PATRICK C., LEONG K.H. 2011: An overview of degradable and biodegradable polyolefins. Prog. Polym. Sci. 36:1015–1049.

3. BEGLEY T.H., MCNEAL T.P., BILES J.E., PAQUETTE K.E. 2003: Evaluating the potential for recycling all PET bottles into new food packaging. *Food Add. Contam.* 19:135–143.
4. GÜBITZ G.M., PAULO A.C. 2003: New substrates for reliable enzymes: enzymatic modification of polymers. *Curr. Opin. Biotechnol.* 14: 577–582.
5. KOZERA-SZALKOWSKA A. 2013: Wartość do odzyskania. *Recykling 5, Zeszyt specjalny 1, cz. I.*
6. KRAWCZAK T. 2013: Komisja Europejska walczy z „reklamówkami”. *Opakowanie* 12: 37–38.
7. KRAWCZAK T. 2014: Wskaźnik recyklingu szkła przekracza próg 70%. *Opakowanie* 4: 66.
8. ŁABUZEK S., PAJĄK J., NOWAK B., MAJDIUK E., KARCZ J. 2002: Biodegradacja polietylenu modyfikowanego poliestrem Bionolle®. *Polimery* 47: 256–261.
9. MATHERS R.T. 2012: How well can renewable resources mimic commodity monomers and polymers? *J Polym. Sci. Part A. Polym. Chem.* 50: 1–15.
10. MATSUMURA S., BEPPU H., TSUKADA K., TOSHIMA K. 1996: Lipase-catalyzed ring opening polymerization of lactide. *Biotechnol. Lett.* 18: 1041–1046.
11. MITA N., TAWAKI S-I, UYAMA H., KOBAYASHI S. 2003: Laccase-Catalyzed Oxidative Polymerization of Phenols. *Macromol. Biosci.* 3: 253–257.
12. MROZIK A., HUPERT-KOCUREK K., NOWAK B., ŁABUZEK S. 2008: Microbial lipases and their significance in the protection of the environment. *Post. Microbiol.* 47: 43–50.
13. NOWAK B. 2006. Biologiczna aktywność mikroorganizmów glebowych zaangażowanych w rozkład folii polietylenowych modyfikowanych syntetycznym alifatycznym poliestrem Bionolle®. Praca doktorska.
14. NOWAK B., PAJĄK J., DROZD-BRATKOWICZ M., RYMARZ G. 2011: Microorganisms participating in the biodegradation of modified polyethylene films in different soils under laboratory conditions. *Int. Biodet. Biodegrad.* 65: 757–767.
15. NOWAK B., PAJĄK J., ŁABUZEK S. 2003: Mechanizmy degradacji tworzyw sztucznych w środowisku. Cz. I. Różnorodność procesów. *Problemy ekologii* 7: 65–68.
16. NOWAK B., PAJĄK J., ŁABUZEK S. 2010: Biodegradacja kompozycji polietylenu oraz poli(tereftalanu etylenu) z poliestrem Bionolle® lub skrobią. *Kompozyty* 10: 224–228.
17. NOWAK B., PAJĄK J., ŁABUZEK S. 2010: Biodegradacja polilaktydu (PLA). *Archiwum gospodarki odpadami i ochrony środowiska.* 12(2): 1–10.
18. NOWAK B., PAJĄK J., ŁABUZEK S., RYMARZ G., TALIK E. 2011: Biodegradation of poly(ethylene terephthalate) modified with polyester Bionolle® by *Penicillium funiculosum*. *Polimery* 55: 35–44.
19. PERLMON D. 1980. *Developments in Industrial Microbiology.* 31, XV.
20. ŻAKOWSKA H., GANCZEWSKI G., NOWAKOWSKI K., GROCHOCKA M. 2013: Ocena cyklu życia (LCA) toreb handlowych wielokrotnego i jednokrotnego użytku. *Opakowanie* 5: 60–74.

## Źródła internetowe

1. Allconnect..., 2014: Allconnect – One less thing to worry about [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.allconnect.com>
2. Apple..., 2014: Apple Environmental Responsibility [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.apple.com/environment>
3. BBC News..., 2014: BBC New Magazine – What should be done about plastic bags Dostępny w Internecie: <http://www.bbc.com/news/magazine-17027990>
4. Bioboard..., 2014: Bioboard – Sustainable Packaging Material [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.bioboard.eu>



5. Braskem, 2014: Braskem – Portal [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.braskem.com.br>
6. Carton King, 2014: Carton King [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.cartonking.com.tw>
7. CEWEP..., 2014: CEWEP – Confederation of European Waste-to-Energy Plants [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.cewep.eu>
8. Coca-Cola..., 2014: Coca-Cola Company – Go behind the bottle [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.coca-colacompany.com/plantbottle-technology>
9. Din Certo, 2014: Din Certo [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.dincertco.de>
10. DuPont Awards..., 2014: DuPont Awards for Packaging Innovation – 2013 Winners [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: [http://www2.dupont.com/Packaging\\_Resins/en\\_US/whats\\_new/article20130516\\_packaging\\_award\\_winners.html](http://www2.dupont.com/Packaging_Resins/en_US/whats_new/article20130516_packaging_award_winners.html)
11. Ecovative..., 2014: Ecovative Design [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.ecovatedesign.com/>
12. Eur-lex, 2014: Eur-lex –Access to European law [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>
13. European ..., 2014: European Bioplastics [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://en.european-bioplastics.org>
14. European Commission..., 2014: European Commission Environment – Directive 2008/98/EC on waste (Waste Frame Directive) [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>
15. Eurostat..., 2014: European Commission – Eurostat Your key to European statistics [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
16. Gizmag..., 2014: Gizmag – 360 Paper water bottle offers renewable alternative to plastic [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.gizmag.com/360-paper-water-bottle/11927>
17. Greener Package..., 2014: Greener Package – PaperBoy paper wine bottle a U.S. first [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: [http://www.greenerpackage.com/renewable\\_resources/paperboy\\_paper\\_wine\\_bottle\\_us\\_first](http://www.greenerpackage.com/renewable_resources/paperboy_paper_wine_bottle_us_first)
18. IETU..., 2014: IETU – Metale ciężkie w powietrzu, Zielona Liga, październik 2013 [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: [http://www.ietu.katowice.pl/O\\_IETU/Pisza\\_o\\_nas/2013\\_Zielona\\_Liga\\_Metale\\_ciezkie\\_w\\_powietrzu\\_atmosferycznym\\_pazdziernik.pdf](http://www.ietu.katowice.pl/O_IETU/Pisza_o_nas/2013_Zielona_Liga_Metale_ciezkie_w_powietrzu_atmosferycznym_pazdziernik.pdf)
19. Komunalny.pl, 2014: [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://komunalny.pl>
20. Nature Flex..., 2014: Nature Flex – Compostable Packaging – Renewable Packaging [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.innoviafilms.com/NatureFlex.aspx>
21. Nauka..., 2014: Nauka w Polsce –serwis PAP poświęcony polskiej nauce [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.naukawpolsce.pap.pl>
22. Plastic..., 2014: Plastic Europe Polska – The Plastics Portal [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.plasticseurope.pl>
23. Recycling..., 2014: Recycling Research and Technology Earth Engineering Center – Columbia University [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.seas.columbia.edu/earth/RRC>

24. The Aluminium..., 2014: The Aluminium Association – Recycling [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie:  
<http://www.aluminum.org/industries/production/recycling#sthash.Dn5YVsNc.dpuf>
25. Vinçotte..., 2014: Vinçotte – OK Compost – Global Solution Provider [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.okcompost.be/en/home/>
26. Zero Waste..., 2014: Zero Waste Europe – EU Waste blog – Phasing waste out of the system [Dostęp: czerwiec 2014]. Dostępny w Internecie:  
<http://www.zerowasteurope.eu/2013/>